

Prosedur Strategis Untuk Mengurangi Level Bahaya *Arc-Flash* Pada *Medium Voltage* Dengan Metode Koordinasi Proteksi Di PT Ipmomi Paiton

Inas Ratnaning Zafirah, Margo Pujiantara, Arif Musthofa

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: margo@ee.its.ac.id, inasratnaningzafirah@yahoo.com

Abstrak—Di area sistem kelistrikan, operasi, dan *maintenance*, perhatian terbesar adalah keselamatan dan keamanan pekerja yang mengoperasikan dan menjaga sistem. Sistem kelistrikan didisain tidak hanya untuk tindakan pencegahan yang diperlukan pada sistem proteksi dan peralatan, tetapi juga harus memperhatikan keselamatan *personal* untuk tingkat tertentu dari *arc-flash* atau busur api karena *arcing fault*. Pada tugas akhir ini, bahaya busur api akan dianalisis dan diperhitungkan. Hasilnya akan diketahui level energi *arc-flash* atau busur api yang mungkin terjadi sesuai standar NFPA 70E-2004. Data yang nanti digunakan diambil dari plant yang telah ditentukan sebelumnya yaitu PT IPMOMI. Dari data tersebut, parameter – parameter yang diperlukan akan dihitung dan diketahui level busur api. Bila diperlukan, maka juga akan dilakukan *resetting* atau penambahan rele *over current*.

Kata kunci—busur api, *personal protective equipment*, *overcurrent protective device*

I. PENDAHULUAN

SUATU sistem pengaman harus mampu bekerja pada kondisi dan *setting* yang telah ditentukan sebelumnya. dimana sistem pengaman mempunyai peranan yang sangat penting dalam mengamankan suatu jaringan atau *plant* industri. Sistem pengaman juga berperan dalam keandalan dari suatu jaringan atau *plant*. Salah satu faktor yang juga ikut dihitung dalam penentuan *setting* sistem pengaman adalah adanya bahaya *arc flash* atau busur api.

Fenomena busur api, dapat terjadi pada suatu jaringan atau *plant* industri. Dimana busur api ini melepaskan energi dan arus yang sangat besar hingga membahayakan peralatan disekitar wilayah yang terdampak dan bahkan membahayakan nyawa pekerja disekitarnya. Studi mengenai bahaya *arc flash*, menggunakan analisis *short circuit* dan analisis koordinasi peralatan pengaman pada *plant* yang bersangkutan. Sehingga, dengan melakukan perhitungan *arcing current* dan *incident* energi akan diketahui level energi bahaya *arc- flash* yang mungkin terjadi pada sistem, dan pemilihan peralatan pengaman dapat diperhitungkan untuk mengurangi level bahaya energi *arc-flash* tersebut.

II. LANDASAN TEORI

A. Pengertian Busur Api (*Arc Flash*)

Busur api atau *arc flash* merupakan suatu fenomena yang berbahaya, dimana kejadian ini disertai dengan adanya pelepasan energi yang disebabkan oleh *arcing* listrik [1]. Busur api yang terjadi, dapat menghasilkan temperatur udara disekitarnya menjadi 35000° F. Terjadinya busur api ini, juga diikuti oleh kilatan cahaya yang dapat mengganggu penglihatan dan bahkan juga dapat merusak mata seseorang. Selain itu, busur api juga dapat menghasilkan ledakan yang sangat keras serta dapat menyebabkan luka bakar bagi pekerja yang terpapar didaerah kejadian [3].

Beberapa hal yang dapat menyebabkan terjadinya peristiwa busur api antara lain:

- Debu, pengarat, binatang.
- *Spark discharge* dari sentuhan/ peralatan yang terjatuh.
- Kegagalan isolasi dari peralatan
- Kegagalan kerja peralatan pengaman

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi besarnya energi *arc flash* yang dapat terjadi diantaranya adalah level tegangan, jarak antar konduktor, dan juga waktu kerja rele untuk mengisolasi gangguan yang terjadi [2]. Selain itu, besar energi busur api yang dihasilkan tergantung dari waktu kerja sistem pengaman akibat gangguan arus hubung singkat. Semakin cepat rele pengaman bekerja semakin kecil pula busur api yang dihasilkan dan berlaku sebaliknya. Oleh karena itu, studi untuk mengetahui besar energi busur api yang dihasilkan pada masing-masing *switchgear* perlu dilakukan untuk memberikan peringatan kepada para pekerja maupun orang disekitarnya akan dampak yang ditimbulkan serta perlengkapan keselamatan yang harus dikenakan sebagai langkah pencegahan agar terhindar dari jatuhnya korban jiwa [4].

B. Perhitungan Energi Busur Api Menggunakan Standart IEEE 1584-2002 [1]

Pada metode ini, hal pertama yang harus diperhitungkan adalah mencari nilai dari arus *arcing fault*. Persamaan

untuk menghitung dari arus *arcing fault* sendiri, ada 2, yaitu tergantung dari besarnya level tegangan bus.

Untuk level tegangan kurang dari 1kV, persamaan arus *arcing fault*nya adalah:

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf}) \quad (1)$$

Sementara untuk level tegangan 1kV – 15kV, perhitungan arus *arcing fault*nya menggunakan persamaan:

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \quad (2)$$

Lalu nilai I_a dapat diperoleh:

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (3)$$

Dimana:

$\lg = \log_{10}$

I_a = arus *arcing* (kA)

K = konstanta untuk konfigurasi terbuka = -0,153 dan konstanta untuk konfigurasi *box* = -0,097

$\lg I_{bf}$ = *bolted fault current* pada gangguan tiga fase (*symmetrical RMS*) (kA)

V = tegangan sistem (kV)

G = jarak celah antar konduktor (mm)

Setelah nilai *arcing current* diketahui maka nilai dari *incident* energi normalisasi dapat dihitung. Dalam perhitungan besar energi yang normal, menggunakan referensi waktu *arcing* dengan durasi 0,2 detik dan jarak dari titik *arcing* ke manusia sebesar 610 mm. Persamaan yang digunakan adalah :

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \quad (4)$$

Dimana:

E_n = *incident energy normalized* (J/cm²)

$K1$ = -0,792 untuk konfigurasi terbuka (*no enclosure*);

-0,555 untuk konfigurasi *box* (*enclosed equipment*)

$K2$ = 0 untuk sistem *ungrounded and high-resistance grounded*;

-0,113 untuk sistem *grounded*

G = jarak/celah antar konduktor (mm)

Untuk mendapatkan nilai G (jarak antar konduktor) dapat mengikuti standar yang sudah ada. Peralatan yang digunakan dalam sistem kelistrikan. Dalam tabel 2.1 dijelaskan untuk jarak celah bus pada beberapa peralatan lain dengan referensi dari IEEE 1584-2002.

Setelah itu besar energi E_n dapat diketahui:

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (5)$$

Setelah nilai E_n didapatkan, untuk menghitung besar insiden energi E digunakan persamaan :

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (6)$$

Tabel 1.
Tabel data jarak celah bus (Jarak Bus) [1]

Kelas Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)
6-15kV Switchgear	153
5kV Switchgear	102
Low voltage switchgear	32
Low voltages MCCs and panelboards	25
Cable	13
Other	Not required

Dimana:

E = *incident energy* (J/cm²)

C_f = faktor pengali

1,0 untuk tegangan diatas 1kV, dan

1,5 untuk tegangan dibawah 1kV

E_n = *incident energy normalized*

T = waktu *arcing* (detik)

D = jarak kerja (mm)

X = jarak *exponent*

Untuk memenuhi semua parameter-parameter dalam menghitung besarnya insiden energi (E) dapat melihat pada tabel 2.2. Parameter yang dapat dicari dalam tabel ini yaitu jarak celah antar konduktor (G), jarak eksponen (x), dan jarak kerja (D). Adapun nilai dari parameter-parameter yang dimaksud adalah sebagai berikut:

Tabel 2.
Tabel data parameter-parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan insiden energi

Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)	Jarak eksponen	Jarak kerja (mm)
0,208 – 1	Open air	10–40	2	-
	Switchgear	32	1,473	455
	MCC and panels	25	1,641	455
	Cable	13	2	455
> 1 – 5	Open air	102	2	-
	Switchgear	13–102	0,973	610
	Cable	13	2	455
>5 – 15	Open air	13–153	2	-
	Switchgear	153	0,973	910
	Cable	13	2	455

Jumlah energi yang dihasilkan *arc-flash* tergantung dari level tegangan tempat arus gangguan terjadi, jarak pekerja dengan sumber *arcing* dan waktu yang dibutuhkan peralatan pengaman arus lebih untuk menghilangkan dan mengisolir gangguan.

C. Jarak Aman Perlindungan

Persamaan untuk perhitungan jarak aman perlindungan berdasarkan IEEE 1584 mengacu pada besarnya insiden energi normalisasi dari busur api. Namun ketika menggunakan analisa metode kurva batas energi, nilai tepat mengenai insiden energi normalisasi tidak dihitung. Bagaimanapun akhirnya untuk menghitung jarak aman pekerja tetap harus dilakukan. Perhitungannya kali ini

mengacu pada besarnya nilai insiden energi pada tiap-tiap kategori. Sehingga yang diperoleh adalah nilai jarak maksimum untuk setiap masing-masing kategori.

Perhitungan level insiden energi (E_{WD}) untuk sistem tegangan antara 1-15kV pada jarak kerja (D_{WD}) adalah :

$$EW_D = 4,184 C_f \text{En} \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x W D} \right) \quad (7)$$

Sedangkan perhitungan level insiden energi (E_B) pada jarak aman perlindungan (D_B) adalah.

$$E_B = 4,184 \text{ C}_f \text{ En } \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x_B} \right) \quad (8)$$

Jika persamaan (2.17) diatas dibagi dengan persamaan (2.18) maka :

$$\frac{E_B}{E_{WD}} = \left(\frac{D_B}{D_{WD}} \right)^{-x} \quad (9)$$

Sehingga untuk mencari jarak aman tiap kategori PPE:

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \frac{\sqrt{E_B}}{\sqrt{E_{WD}}}} \quad (10)$$

Sedangkan untuk sistem lebih dari 15 kV sebagai berikut:

$$D_B = \frac{D_{WD}}{\sqrt[2]{\frac{E_B}{E_{WD}}}} \quad (11)$$

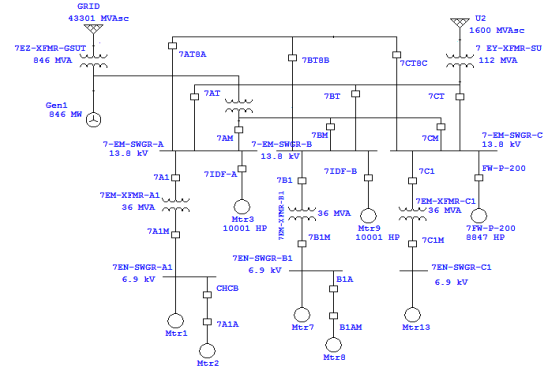
III. SISTEM KELISTRIKAN PT. LINDE

PT. IPMOMI PAITON berada di desa Bhinor, kecamatan Paiton, provinsi Jawa Timur. Seperti pada gambar 1, lebih tepatnya di areal pembangkit listrik PLN Jl. Raya Surabaya – Situbondo Km. 141. Letak geografis PT. IPMOMI berada di pesisir pantai Utara Pulau Jawa, yang berdekatan dekat Selat Madura. 142 km ke arah tenggara Surabaya.



Gambar 1. Peta Lokasi PLTU Paiton-probolinggo

PT IPMOMI PAITON memiliki dua unit pembangkit yang menggunakan mesin *turbogenerator* berbahan bakar batubara dengan kapasitas 2 x 615 MW. Unit tersebut beroperasi dengan rata-rata 83% *capacity factor* pertahun dan memproduksi listrik rata-rata 8.943.084 MW per tahun, serta mengkonsumsi batubara 4,3 juta ton per tahun. Generator pada PT IPMOMI digunakan untuk menyuplai listrik ke jaringan ekstra tinggi 500 kV dan dipakai untuk pemakaian sendiri dimana tegangan output generator diturunkan melalui *transformer* sesuai dengan kebutuhan. Untuk kebutuhan saat *start* diambilkan dari 150 kV dari PLN. Pada sistem tegangan ekstra tinggi tenaga listrik yang dihasilkan oleh *power plant* disuplai ke jaringan sebesar 500 kV dan selanjutnya beberapa *transformer* tegangannya diturunkan sesuai dengan kebutuhan. Adapun sistem kelistrikan perusahaan ini dapat dilihat pada gambar2.



Gambar 2. Sistem Kelistrikan PT IPMOMI PAITON

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA

A. Hasil Simulasi Busur Api

Simulasi perangkat lunak ETAP menggunakan perhitungan berdasarkan standar IEEE 1584-2002. Simulasi dilakukan pada tegangan menengah 13.8 KV dan 6.9 KV di sistem kelistrikan PT IPMOMI PAITON. Berikut akan ditampilkan besarnya energi busur api (*arc flash*) pada bus-bus dengan koordinasi proteksi *existing*. Data-data berikut berisikan Bus ID, besarnya arus *bolted fault*, arus *arching*, FCT (*Fault Clearing Time*), Insiden Energi, dan Kategori Bahaya. Data berikut akan ditampilkan pada tabel 3 dimana level tegangan *bus-bus* nya adalah 13.8 KV dan 6.9 KV.

Tabel 3.
Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi Eksisting pada PT
IPMOMI PAITON

ID	Tegangan Bus (kV)	Arus Bolted Fault (KA)	Arus Arching (KA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Energi Levels
7EMSW GRA	13.8	72.59	68.11	0.1	10.722	Level 3
7EMSW GRB	13.8	72.59	68.11	0.1	10.722	Level 3
7EMSW GRC	13.8	72.59	68.11	0.1	10.722	Level 3
7ENSW GRA1	6.9	47.1	44.53	0.45	24.961	Level 4
7ENSW GRA1A	6.9	47.71	44.53	0.1	5.547	Level 2
7ENSW GRB1	6.9	45.86	43.37	0.45	24.26	Level 4
7ENSW GRB1A	6.9	45.86	43.37	0.1	5.391	Level 2
7ENSW GRC1	6.9	43.21	40.91	0.45	23.158	Level 4

Tabel 4.
Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Setelan *Resetting* di PT IPMOMI
PAITON

ID	Tegangan Bus (kV)	Arus Bolted Fault (KA)	Arus Arching (KA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	Energi Levels
7EMSWGRA	13.8	72.59	68.11	0.116	11.93	Level 3
7EMSWGRC	13.8	72.59	68.11	0.116	11.93	Level 3
7EMSWGRC	13.8	72.59	68.11	0.116	11.93	Level 3

7ENSWGRA 1	6.9	47.1	44.53	0.11	7.53	Level 2
7ENSWGRA 1A	6.9	47.71	44.53	0.11	7.53	Level 2
7ENSWGRB 1	6.9	45.86	43.37	0.11	7.32	Level 2
7ENSWGRB 1A	6.9	45.86	43.37	0.11	7.32	Level 2
7ENSWGRC 1	6.9	43.21	40.91	0.11	6.87	Level 2

B. Perhitungan Busur Api Menggunakan Standart IEEE 1584-2002

Dalam penentuan analisa busur api terlebih dahulu harus dicari besarnya arus gangguan *bolted* dan FCT (*Fault Clearing Time*) pada tiap-tiap bus. Arus gangguan *bolted* adalah arus hubung singkat tiga fase, $\frac{1}{2}$ cycle saat pembangkitan maksimum. Pada arus *bolted* ini, kontribusi arus dari beban juga ditambahkan. Sedangkan FCT adalah besarnya durasi waktu yang dibutuhkan rele untuk mengamankan gangguan.

• BUS 7EMSWGRA

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(72.59)$$

$$\log(I_a) = 1,833, I_a = 68.11 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555 + (-0,133) + 1,081 \times 1,833 + 0,0011 \times 153}$$

$$En = 28.95 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 28.95 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 47.61 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 47.61 / 4,184$$

$$Incident \text{ Energy} = 11.38 \text{ cal/cm}^2$$

• BUS 7EMSWGRB

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(72.59)$$

$$\log(I_a) = 1,833, I_a = 68.11 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555 + (-0,133) + 1,081 \times 1,833 + 0,0011 \times 153}$$

$$En = 28.95 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 28.95 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 47.61 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 47.61 / 4,184$$

$$Incident \text{ Energy} = 11.38 \text{ cal/cm}^2$$

• BUS 7EMSWGRC

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(72.59)$$

$$\log(I_a) = 1,833, I_a = 68.11 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555 + (-0,133) + 1,081 \times 1,833 + 0,0011 \times 153}$$

$$En = 28.95 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 28.95 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 47.61 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 47.61 / 4,184$$

$$Incident \text{ Energy} = 11.38 \text{ cal/cm}^2$$

• BUS 7EMSWGRA1

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(47.1)$$

$$\log(I_a) = 1,648, I_a = 44.52 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555 + (-0,133) + 1,081 \times 1,648 + 0,0011 \times 153}$$

$$En = 18.27 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 18.27 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 30.045 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 30.045 / 4,184$$

$$Incident \text{ Energy} = 7.181 \text{ cal/cm}^2$$

• BUS 7EMSWGRA1A

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(47.71)$$

$$\log(I_a) = 1,654, I_a = 45.11 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555 + (-0,133) + 1,081 \times 1,654 + 0,0011 \times 153}$$

$$En = 18.54 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 18.54 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 30.49 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 30.49 / 4,184$$

$$Incident \text{ Energy} = 7.28 \text{ cal/cm}^2$$

• BUS 7EMSWGRB1

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(45.86)$$

$$\log(I_a) = 1,637, I_a = 43.37 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,133)+1,081 \times 1,637+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 17.77 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 17.77 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 29.23 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 29.23 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 6.98 \text{ cal/cm}^2$$

- BUS 7EMSWGRB1A

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(45.86)$$

$$\log(I_a) = 1,637, I_a = 43.37 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,133)+1,081 \times 1,637+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 17.77 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 17.77 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 29.23 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 29.23 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 6.98 \text{ cal/cm}^2$$

- BUS 7EMSWGRC1

Perhitungan arus *arcing* (I_a):

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(43.21)$$

$$\log(I_a) = 1,611 I_a = 40.92 \text{ kA}$$

Perhitungan Insiden Energi (E):

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,133)+1,081 \times 1,611+0,0011 \times 153}$$

$$E_n = 16.66 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 16.66 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 27.402 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 27.402 / 4,184$$

$$\text{Incident Energy} = 6.54 \text{ cal/cm}^2$$

C. Penentuan Jarak Aman Batas Perlindungan

Untuk mengkalkulasi jarak aman batas perlindungan, menggunakan persamaan seperti pada persamaan (12).

Flash protection boundary dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (12)$$

Keterangan:

D_B = batas jarak dari titik busur api (mm)

C_f = faktor perhitungan (1.0 untuk tegangan di atas 1 kV, 1.5 untuk tegangan di bawah atau sama dengan 1 kV)

E_n = energi insiden normal

E_B = energi insiden dalam J/cm² pada batas jarak

t = waktu (detik)

x = jarak exponen

I_{bf} = bolted fault current (kA)

E_B dapat disetting 5.0 J/cm² untuk *bare skin (no hood)* atau *rating* dari PPE yang diajukan (5.0 J/cm² = 1.2 cal/cm²).

- BUS 7EMSWGRA

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = [4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 28.95 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 9223.07 \text{ mm} = 30,25 \text{ ft}$$

$$(1 \text{ mm} = 0.00328 \text{ ft})$$

- BUS 7EMSWGRB

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = [4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 28.95 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 9223.07 \text{ mm} = 30,25 \text{ ft}$$

- BUS 7EMSWGRC

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = [4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 28.95 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 9223.07 \text{ mm} = 30,25 \text{ ft}$$

- BUS 7EMSWGRA1

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = [4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 18.27 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 5746.698 \text{ mm} = 18.84 \text{ ft}$$

- BUS 7EMSWGRA1A

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = [4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 18.54 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 5833.99 \text{ mm} = 19.135 \text{ ft}$$

- BUS 7EMSWGRB1

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = [4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 17.72 \left(\frac{0,116}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 5568.974 \text{ mm} = 18.266 \text{ ft}$$

- BUS 7EMSWGRB1A

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = [4,184 \text{ Cf En } (\frac{t}{0,2}) (\frac{610^x}{E_B})]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 17.72 (\frac{0,116}{0,2}) (\frac{610^{0,973}}{5})]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 5568.974\text{mm} = 18.266 \text{ ft}$$

- BUS 7EMSWGRC1

Perhitungan jarak batas perlindungan (D):

$$D_B = [4,184 \text{ Cf En } (\frac{t}{0,2}) (\frac{610^x}{E_B})]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = [4,184 \times 1 \times 16.66 (\frac{0,116}{0,2}) (\frac{610^{0,973}}{5})]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 5226.887\text{mm} = 17.144 \text{ ft}$$

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan analisa dan simulasi yang dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. Penentuan kategori PPE antara metode kurva batas energi dengan metode standart IEEE 1584-2002 menunjukkan hasil yang sama.
2. Adanya perbedaan pada hasil perhitungan batas jarak aman antara metode kurva batas energi dengan standart IEEE 1584-2002. Hal ini disebabkan karena pada metode kurva batasan energi, tidak memperhitungkan nilai insiden energi serta fault clearing time pada masing – masing bus.
3. Analisa busur api untuk penentuan kategori PPE menggunakan kurva batasan energi ini sesuai dilakukan pada sistem kelistrikan dengan memiliki banyak bus. Karena, metode ini cukup memasukkan karakteristik kurva pengaman pada kurva batasan energi. Sehingga pada perpotongan kedua kurva tersebut dapat ditentukan kategori PPE yang diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Std. 1584-2002. “*Guide for Performing Arc flash Hazard Calculations*”.
- [2] Timothy B. Dugan, “*Reducing The Arc flash Hazard*,”*IEEE Industry Application Magazine*., May-June 2007
- [3] Yasser Moustafa Atwa , “*Mitigating Arc-Flash Exposure*,” *IEEE Industry Application Magazine*., July-August 2011.